

高功率激光聚变物理实验技术进展¹⁾

林 尊 琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

激光核聚变实验技术的进步对研究领域的迅速发展起着十分重要的推动作用。本文从惯性约束聚变最基本的概念出发简单评述这一领域实验物理诊断研究工作的特点和主要进展, 也穿插介绍了我们近年来在等离子体实验技术发展方面所做的一点工作。

利用高功率激光实现受控热核聚变的途径提出到现在已有 20 多年。但是, 因具体研究的若干方面与热核武器设计有一定关联, 加上研究工作的目标之一明确包括武器模拟^[1], 这一领域的一些研究细节至今尚不能完全公开。

1972 年美国政府对激光微球靶内爆聚心点火概念及理论计算结果的解密, 在很大程度上推动了国际物理学界对激光核聚变基础物理研究的投入。1988 年 8 月第二次解密公布了美国 Halite-Centurion 保密计划中部分有关高增益聚变的关键模拟实验数据^[1]。简言之, 近年来用地下核爆来模拟激光聚变的条件得出结论, 使用 $0.35\mu\text{m}$ 波长, 10^7J 激光来轰击聚变靶丸可获得 100 倍输入激光能量的热核能输出, 从而实现高增益。核爆模拟实验结果与理论计算一维程序预计高度符合。这一消息给世界各国从事有关研究的科学家以极大鼓舞。1988 年 9 月在西班牙马德里召开的第 19 届欧洲激光与物质相互作用会议上, 与会世界各国著名科学家联名发表“马德里宣言”呼吁各国政府共同投资, 采取联合行动, 开展跨国合作研究。但终因保密问题而没有得到多数大国政府的响应。

尽管如此, 面对 21 世纪人类行将最终控制热核聚变, 使之造福人类的美好前景, 对这样一个重大物理前沿领域的共同科学和技术投入仍具吸引力。这里确实需要大批高水平的物理学家为之开拓、拼搏、合作和奉献, 需要集中更多人类智慧攻克难关去实现最终目标。美国政府

在这一领域两次解密, 从战略方面考虑也正是为了吸引更多优秀人才, 推动主体研究工作更快发展, 而且也取得了一定成效。

本文将从简单介绍激光聚变的几个基本概念入手, 进一步评述这一领域实验物理和诊断研究工作的特点, 也穿插介绍一些我们近年在实验技术发展方面的工作。

一、微球靶的内爆聚心点火 (或中心点火)概念

激光聚变是惯性约束聚变的一种方式, 是靠向靶心会聚的惯性压力束缚热核材料实现聚变反应的。当激光直接、均匀、对称地辐照聚变用球型靶丸表面时, 靶壳表面物质消融外喷所形成的反冲惯性力把壳内未被消融的热核材料均匀向中心挤压, 使靶丸压缩成短时间的高温高密度状态。这种激光驱动靶丸压缩方式称为直接驱动。先用激光辐照一个大空腔内高原子序材料, 高效率地转换成软 X 光, 用空腔内更加均匀的软 X 光辐照腔内聚变靶丸则称为间接驱动^[2]。地下核爆模拟激光聚变用的是软 X 光驱动。如果压缩后的热核材料温度升到约一亿度, 而且密度与惯性力约束时间的乘积满足劳森判据, $n\tau \geq 2-5 \times 10^{14}\text{s/cm}^3$, 热核反应将迅速发生, 造成微型氢弹爆炸。这种微型爆炸释放的能量是有限的, 可以被特殊设计的材料

1) 本文介绍的部分工作获中国物理学会第二届胡刚复物理学奖。

吸收,进而转化为电能.中心点火概念是在上述内爆向心压缩的基础上设计和发展起来的.它不需要全部未被消融的燃料都达到一亿度的高温和满足劳森判据,而只要求会聚到最中心百分之一到二的一小部分热核燃料首先点火.利用热核反应产生的 α 粒子加热其余部分高度压缩的燃料,引发其余部分的热核反应.中心点火大大节省了驱动激光能量需求,但对聚心压缩的对称性有更严格的要求.作为初始条件的技术关键之一是非常均匀的靶丸表面驱动激光或X光辐照强度分布(最大涨落 $\leq 1-2\%$).这里,实验物理最为关心的问题之一是内爆过程中球型靶壳与热核燃料界面上可能产生的一种流体力学不稳定性——瑞利·泰勒不稳定性.这种不稳定性发展会使靶壳材料与燃料混合,造成燃料降温,导致点火失败.实现中心点火的第二个技术关键是激光脉冲时间整形,它使热核燃料受到的惯性压力随时间缓步增加,仅在压缩的最后过程施加一个大的冲击压力,使燃料中心迅速升到点火温度.第三个技术关键是等熵压缩,或低增熵压缩.聚变靶丸燃料在压缩的最后状态应达到1000倍左右液体氘氚燃料密度,承受的压力上升到 10^8 大气压以上.燃料球直径可由5—10mm级压缩到0.15—0.3mm,使体积压缩三万到六万四千倍.如果在压缩初始或中期过程中有过多外界能量直接输入燃料使其增熵,欲压缩到所需燃料密度则变得十分困难.控制等熵压缩过程的物理因素除冲击波预热控制外,还包括激光等离子体相互作用过程中产生超热电子和硬X射线的控制等.

二、内爆物理过程的实验诊断

微球靶内爆聚心点火所需驱动激光脉冲宽度为10ns级,而相当大一部分激光能量需在最后几百皮秒级时间内释放,施加到靶丸上.因此实验诊断所面临的是一个复杂的小空间尺度、快速时间变化、单次行为的物理过程.考虑到目前实验室常规研究中使用的靶直径仅为百

微米级,激光脉冲宽度为纳秒或亚纳秒级,因此诊断设备起码要求达到百皮秒级的时间分辨率和十微米级空间分辨率.

聚变等离子体实验高时空分辨的要求促进了高速光电子学器件发展.单次测量时间分辨达10—30ps的X光条纹相机及分辨率为100ps级的分幅X光条纹相机都已在实验室研制出来用于激光等离子体诊断.有些甚至开始商品化.中国科学院西安光学精密机械所近年来成功研制的50ps分辨率高性能X光条纹相机已经在我国激光聚变和X光激光基础研究中发挥了重要作用¹⁾.

X光背景照明阴影成像是靶内爆动力学研究的一项十分重要的诊断方法.它适合于较低激光靶面辐照强度,靶内爆产生较冷核心区的诊断.已知电磁波穿透稠密等离子体的深度与电磁波波长平方成反比,而靶内爆核心区等离子体数密度高达 $10^{21}-10^{27}\text{cm}^{-3}$.容易理解,选用X光波段的电磁波来探测靶内爆时空演化过程是必要的.实验使用的背景X光照明斑由相对于主驱动激光设定延迟时刻到达的另一束高功率、短脉冲激光均匀辐照一个副靶产生.副靶产生的X光斑尺度大于主靶球,并在空间位置上与主靶球足够接近.使用滤片X光针孔成像术则可拍摄在背景X光出现瞬间被“冻结”的内爆球靶X光背景阴影图象.我们在国外实验室1980年左右发展起来的X光背景照明诊断技术基础上把一发激光打靶只能获得一幅X光背景阴影图象进一步发展到图1所示的一发四幅,不仅有效地提高了该项诊断实验的可靠性和精确度,还为相关联地研究球靶内爆二维动力学过程提供了重要技术基础¹⁾.图1(a)中IV、V路主激光从相对方向对称辐照主靶球;在副靶上A、B、C、D四个背景X光斑按图1(b)所示时间顺序相继出现,经过精密调节的X光滤光多针孔相机把四个不同时刻的主靶球内爆等离子体阴影成在底片上.

X光背景照明还用于瑞利·泰勒流体不稳

1) 张小秋等,第18届国际高速摄影会,西安,1988,8,邀请报告.

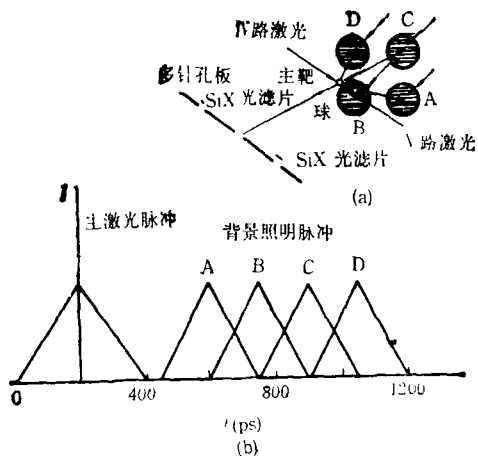


图1 (a)四分幅X光背景照明诊断排布(b)背景照明脉冲相对主激光脉冲延迟示意图

定性分解实验研究。这种不稳定性增长率与不稳定性空间波长的倒数 k 与两流体界面加速度 a 的乘积之平方根成正比, $\gamma = A\sqrt{ka}$ 。 A 因子由界面两侧流体密度差及消融状况决定。经典理论指出, 波长等于聚变球靶靶壳厚度时不稳定性增长率为最高。分解实验中如在平面或弯曲箔靶上人为刻蚀波长约等于箔厚的密度扰动, 则可用X光背景照明成像术来诊断激光对靶消融过程中箔靶密度扰动的时空分布非线性增长, 从而估算其增长率。

完备的聚变靶总体实验需要对下述参数进行测量: (1) 热核中子产额、出现时间及持续宽度; (2) 燃料离子温度; (3) 靶壳推进剂和燃料的压缩密度及最后压缩半径; (4) 球靶中心部位X射线像和中子像等。近年来这些诊断项目中最大的进展是美国利弗莫尔实验室(Lawrence Livermore National Laboratory)用自制X光分幅相机, 拍摄到靶中心部位特定X光能区的不同时刻X光辐射分布图象。相机的时间和空间分辨率分别达到120ps和10 μ m。而中子像是时间积分的。采用编码光阑技术获得。其空间分辨率达到30—40 μ m。

三、冕区物理过程

激光等离子体在靶面电子密度分布可划分

为三个基本区域。如图2所示, 电子数密度 $n_e \approx \frac{10^{21}}{\lambda^2} \text{cm}^{-3}$ (λ 为以微米为单位的入射激光波长)的界面定义为临界密度面, 或称临界面。这一密度的局部等离子体频率等于驱动激光频率。临界面外低密度区统称冕区。所有入射激光都在冕区被吸收或被反射并进行复杂的光波与等离子体波相互作用。电子数密度 $n_e = 2 \sim 3 \times 10^{23} \text{cm}^{-3}$ 的界面为消融面。消融面两侧等离子体运动方向相反。向靶一侧为压缩区, 另一侧为消融区。临界面附近为入射激光能量主吸收区。吸收的能量借助于电子热传导经消融区传到消融面与内爆物理过程衔接。但冕区波相互作用过程产生的超热电子、快离子和硬X射线可穿越消融区直接在压缩区淀积能量, 使燃料尚未压缩到最后状态时就增熵而提高温度, 导致压缩失败。因而研究和控制冕区有害的波相互作用过程, 提高激光经典逆韧致吸收效率对激光聚变研究至关重要。

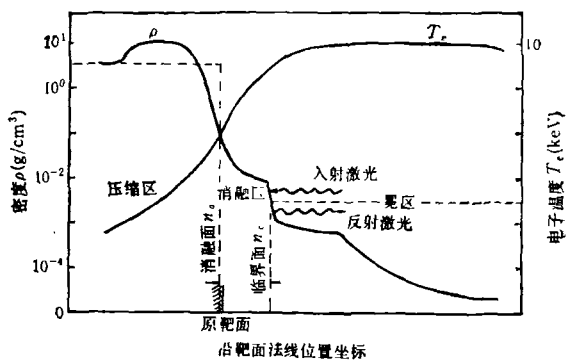


图2 激光等离子体电子密度 ρ (或数密度 n_e) 及电子温度 T_e (keV) 空间分布示意图

十年前固体钨玻璃激光输出高转换效率倍频技术的突破使可选择的激光聚变驱动器工作波长由1.06 μ m扩展到0.53, 0.35和0.26 μ m。氟化氦准分子激光0.249 μ m紫外波段输出又提供了一个短波长工作的选择。图3给出世界上第一次系统性实验诊断获取激光等离子体对不同波长激光吸收规律性的结果^[4]。工作波长选择的结论是, 若把激光靶面辐照强度控制在 $4 \times 10^{14} \sim 10^{15} \text{W/cm}^2$ 范围内, 用0.53 μ m二倍

频, 或 $0.35\mu\text{m}$ 三倍频波长激光驱动靶, 靶等离子体经典逆切致吸收较 $1.06\mu\text{m}$ 基频驱动有近一倍增加。冕区波相互作用阈值上升使超热电子和硬 X 射线产生受到抑制。其综合效果使直接驱动聚变靶丸的消融压力和热动力学转换效率明显提高。

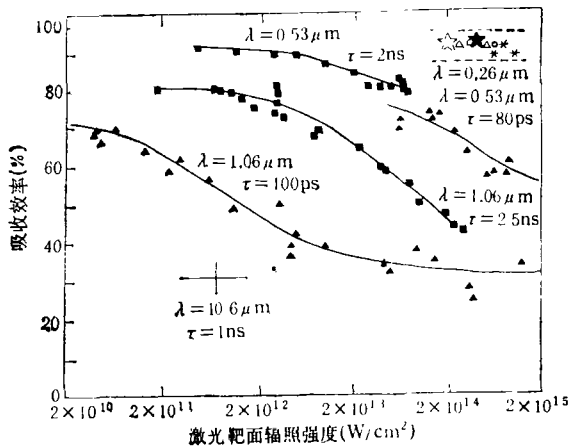


图3 法国最早(1981年)的系统诊断不同驱动激光波长和脉冲宽度条件下激光等离子体吸收效率与激光靶面辐照强度的实验定标规律

由于短波长激光的使用能有效抑制受激拉曼散射引发的超热电子, 而受激拉曼过程是间接驱动工作方式中最严重的非线性过程之一, 因此间接驱动靶更需要短激光波长注入, 以清理内爆靶丸外围的辐射环境, 消除靶心预热源。

近年来, 冕区相互作用物理实验技术方面又有许多新进展。其中最重要的两项是激光靶面均匀辐照技术和宽频带激光的使用。

美国海军实验室使用大于驱动激光光学相干长度的二维阶梯反射镜, 人为制造了在激光靶面上的空间非相干叠加, 同时把驱动激光频带增宽, 以构成时间非相干。这项技术获得显著抑制激光与等离子体相互作用不稳定性的主要结果^[9]。日本大阪大学和美国罗彻斯特(Rochester)大学使用涂膜技术制做无规面元 $0, \pi$ 两种位相改变的无规位相板, 也有效地平滑掉激光辐照靶面通常产生的光学干涉条纹, 发挥了靶面均匀辐照的功效^[6]。这项技术与激光二倍频技术相结合, 使罗彻斯特大学创下直接驱动靶丸内爆压缩到液体氙燃料密度 100 倍的

最高纪录^[7], 仅比间接驱动的纪录 200 倍结果小一个倍数因子。我们高功率激光物理联合实验室发展的第三种蝇眼透镜阵列法^[8]获得靶面大面积平坦的均匀辐照效果, 在重要的冲击波实验中产生了实验所期望的十分平整、陡峭的冲击波波前。获得的实验物理图象和数据精度明显好于国外实验室已发表的同类实验结果^[9]。

有趣的是, 使用人为引入光学非相干或宽频带技术不仅对直接驱动, 而且对间接驱动工作中 X 射线转换效率也有很大影响。最近美国两家实验室的一次联合实验发现, 靶面均匀光辐照(利用了宽频带)产生 X 射线的转换效率比非均匀辐照提高了 10—30%。这使美国和日本的主要实验室最近开始对宽频带驱动激光的发展给与特别重视。

实际上, 10 年前我们已经提出并对宽频带激光与等离子体相互作用做了约 5—6 年比较细致的先期研究工作。也多次在国际学术刊物提供有关研究结果, 为相互作用领域国际上的研究工作进展做出了贡献。

我们较早建立了等离子体后向受激布里渊散射拓宽频带型的宽带源, 实现了高功率水平的宽带激光放大及宽带(30—40 Å)、窄带(~1 Å)输出实时切换等一系列有特色的实验配套技术。主要特点是, 诊断中可对两种频带激光打靶做几乎全同实验条件下的实时比较。大量对比实验表明, 宽频带激光打靶的真正效果是靶面均匀照明, 而不主要是频带加宽降低激光靶面单色亮度, 从而抑制冕区非线性相互作用的效果。我们的实验证明^[10], 在宽带建立足够好的均匀照明条件下, 入射激光在冕区的有质动力自聚成丝不稳定性明显受到抑制而减少了自聚成丝内部共振吸收的可能性。这样, 诊断获得的硬 X 射线温度降低和相应超热电子抑制过程则较为容易理解。进一步深入进行综合诊断(包括等离子体发射的二次谐波和 3/2 次谐波频移和加宽, 谐波时间发展尖峰调制结构、空间分裂特性, 快离子结构、慢离子双峰结构等多种细致物理过程参数等)以及在研究过程中发展

的细丝共振吸收理论、激光带宽对参量不稳致稳理论等在有关国际学术界引起了重视。去年一次国际学术讨论会上,有两个美国实验室都强调各自实验室最早重视和进行宽频带方面的研究工作,一位澳大利亚系主任教授 H. Hora 忍不住发言“打抱不平”,他列举事实说明,真正一直搞宽频带研究,最早认识到宽频带重要性的应该是中国人。

激光靶面均匀辐照在冕区相互作用过程中产生重要影响的实质原因,可能要从激光在等离子体中小尺度自聚现象中寻找答案。自聚焦的直接效应是局部区域激光强度大大高于靶面激光平均辐照强度。加上自聚焦动态过程本身是冕区等离子体密度扰动源,若干冕区非线性相互作用过程会在自聚焦过程中被激发,产生等离子体谐波辐射。因此,我们较早使用谐波辐射时间、空间、光谱诊断来探索冕区等离子体中的激光自聚成丝的物理过程,提出不稳定自聚的假定性模型^[10,11]。近年来,在以前工作基础上,我们放弃了传统全激光斑等离子体谐波发射诊断方法,而采用成像打靶方式,人为建立靶面上单个或分立的小光斑。使这些小光斑半径减少到 $10\mu\text{m}$ 级。这样我们可以分立地诊断这些小光斑自聚焦与预形成等离子体相互作用行为,在实验中获得了有意义的结果^[12]。更深的研究有望揭示非常复杂的激光等离子体自聚焦行为的规律。

四、激光等离子体相互作用实验诊断

冕区相互作用激发的等离子体波受到阻尼会加速电子成为超热电子。超热电子逃逸过程中形成的强静电场加速离子产生快离子,或经韧致辐射产生极强的硬 X 射线。因此,相互作用物理实验中对电子、离子、X 光能谱测量都跨越相当宽广的范围。除能谱分布,需要诊断的基本量还包括能量平衡分布、空间分布和时间发展过程等。对于间接驱动方案还需要知道空腔内的 X 光辐射温度和靶丸 X 光辐照均匀性。实验诊断工作量是非常大的,但有相当多数的

相互作用基础物理实验都可以做单项分解研究,因而很多工作都在较小型的高功率激光装置上进行。主要目标是机理研究及获取诊断物理量定标规律。

值得注意的是,冕区波相互作用不稳定性增长速度极快。因此,相互作用过程研究要求诊断设备时间分辨精度逐步提高到 1ps 甚至亚皮秒级,空间分辨则希望达到 $1\mu\text{m}$ 级。这些要求显然比内爆过程诊断的要求高得多。

另一方面,由于冕区电子密度比压缩区低得多,使用可见光探针或紫外光探针就可以穿过冕区,甚至穿过临界密度面,获取冕区电子密度分布,等离子体喷射结构等信息。这种光波段探针诊断所需激光能量远小于诊断内爆过程背景 X 照明的需求,而且比较容易做到 $3\text{--}5\mu\text{m}$ 的空间分辨精度。

我国第一台应用型六路钽玻璃高功率激光等离子体实验装置自 1980 年鉴定后投入正式运转至今已 11 年。多年来,我们围绕这台装置在各项相继进行的激光等离子体基础前沿领域实验研究中逐步建立,配置了七项主要用于相互作用研究的高级诊断和装置配套功能设施。这些诊断技术和相应建立的配套设施提高了实验室多功能应用水平,增强了实验室从事高难度基础物理实验的能力。这些技术发展的一些单元已经得到推广应用。然而,我们在诊断实验技术方面所做的工作还只是适应单元基础研究的一小部分,随着我们高功率激光物理联合实验室拥有的国内最大“神光装置”于 1986 年鉴定后投入正式运转,中国工程物理研究院围绕该装置已经建立了一套相当完备的激光聚变诊断系列^[13],为更深入的大规模总体研究正在不断做出非常有价值的物理工作。

20 年来世界范围激光聚变实验技术经历了一个快速发展过程。最近地下核爆对靶物理模拟的突破以及相互作用领域短波长、宽频带、均匀辐照技术的突破使人们有理由对“从现在起到约 2020 年前演示聚变电站之间不存在科学上的拦路虎”^[14]的观点持乐观态度。然而前进的道路并不平坦,在靶物理和相互作用物理

两方面还有许多复杂的和关联性的物理和技术问题等待解决。需要付出巨大努力才有希望实现最终目标。

[1] E. Storm 等, 国外激光, No. 4(1989), 1.
[2] 常铁强等, 强激光与粒子束, 1(1989), 193.
[3] 林尊琪、李家明等, 物理学报, 37(1988), 20.
[4] C. Garban-Labaune et al., *Phys. Rev. Lett.*, 48(1982), 1018.
[5] R. H. Oberschain et al., *Phys. Rev. Lett.*, 56

(1986), 2807.
[6] Y. Kato et al., *Phys. Rev. Lett.*, 53(1984), 1057.
[7] J. Hecht, *Laser & Optronics*, 7-5(1988), 24.
[8] Deng Ximing et al., *Appl. Opt.*, 25(1986), 377.
[9] 顾援等, 物理学报, 37(1988), 1690.
[10] Tan Weihan et al., *Laser and Particle Beams*, 3(1985), 237; Lin Zunqi et al., *Laser and Particle Beams*, 4(1986), 223.
[11] Lin Zunqi et al., *J. Phys. D.*, 14(1981), L 35-37.
[12] 林尊琪等, 物理学报 40(1991), 234.
[13] 胡仁宇、郑志坚, 强激光与粒子束, 2(1990), 1.

1992 年度《物理》将于 1991 年 11 月 在各地邮局订阅

——附 1992 年《物理》部分内容预告

1. 热情欢迎科研单位、学校、企业界（包括工厂、公司等）的图书馆、资料室、教研组、科研组、科研生产管理部门和个人订阅中国物理学会主办的通报类月刊——《物理》。

2. 请于 1991 年 11 月份到当地邮局订阅 1992 年度《物理》。订阅时只需将我刊的国内邮发代号 2-805 告诉邮局的同志即可（《物理》的国外刊号为 M51）。

附 录

1992 年《物理》部分内容预告

(1) 1992 年第 1 期《物理》要目如下：

物理学与科学技术的关系(冯端, 学部委员, 中国物理学会理事长);

简单的仪器也能获得重要的成果——从扭摆内耗仪的发明和应用谈起(葛庭燧, 学部委员)

毫微米科学技术——面向 21 世纪的新科学技术(李民乾);

量子光学的回顾与展望(郭光灿);

“物理学与高技术新材料专题系列”第一讲(共 24 讲, 陆续刊登);

飞秒光谱技术——fs 领域的现状与展望(刘天夫);

《90 年代物理学》: 原子、分子和光学物理(陆怀南编译);

(2) 1992 年期间将出一期纪念中国物理学会成立 60 周年和《物理》创刊 20 周年专刊。

(本刊编辑部)